



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

REETTA KALLIOVALKAMA  
PUUN PALOSUOJAUS LEVYTYKSELLÄ

Kandidaatintyö

Tarkastaja:professori Mikko Malaska

## TIIVISTELMÄ

**REETTA KALLIOVALKAMA:** Puun palosuojaus levytyksellä

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 20 sivua

Maaliskuu 2018

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: Mikko Malaska

**Avainsanat:** puu, palosuojaus, hiiltymissyvyys, hiiltymisnopeus

Tässä kandidaatin työssä tutkitaan, miten levytyksellä suojaaminen vaikuttaa puurakenteiden palonkestävyyteen. Työ suoritetaan kirjallisuustutkimuksena käyttäen esimerkiksi Ruotsissa aiheesta tehtyjen tutkimusten raportteja. Työssä käsitellään perinteiset puuelementit ja CLT-elementit erikseen, sillä niiden ominaisuudet eroavat merkittävästi toisistaan.

Levytyksen suojausvaikutuksia tarkastellaan hiiltymisen avulla. Puun hiiltyminen oletetaan ajasta riippumattomaksi vakioarvoksi. Eri puumateriaaleille on käytössä standardoidut hiiltymisnopeuden mitoitusarvot, joiden avulla puun hiiltymissyvyys eri ajanhetkillä on arvioitavissa. Puun hiiltyminen oletetaan alkavan 300 °C: en lämpötilassa. Hiiltyminen voi alkaa aikaisemmin tai myöhemmin riippuen esimerkiksi happiolosuhteista.

Levytyksen avulla vaikutetaan hiiltymisen alkamisajankohtaan ja hiiltymisnopeuteen. Hiiltyminen voi alkaa levytyksen takana tai vasta levytyksen petettyä. Levytyksen avulla on tarkoitus siirtää rakenteen hiiltymisen alkamisajankohtaa, jotta rakenne säilyttäisi täyden kantavuutensa mahdollisimman pitkään. Hiiltyminen tapahtuu hiiltymisnopeuden mitoitusarvon lisäksi kahdella muulla nopeudella. Puu hiiltyy mitoitusarvoa hitaammin levytyksen takana, kun levytys vielä suojaa rakennetta liekeiltä, mutta lämpötila on noussut tarpeeksi. Puu hiiltyy mitoitusarvoa nopeammin levytyksen pettämisen jälkeen, kunnes hiiltymisnopeus palaa takaisin mitoitusarvoon.

Puun palosuojaus levytyksellä parantaa puurakenteen kantokykyä palotilanteessa. Suunnitteluvaiheessa on huolehdittava, että levytyksen hyödyt ovat suuremmat kuin haitat. Hiiltymisen alkamisajankohdan on siirryttävä riittävästi, jotta hiiltymisnopeuden kasvu levytyksen pettämisen jälkeen ei kumoa hiiltymisen alkamisajankohdan siirtymisestä saatua hyötyä.

## ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laboriolle. Työn ohjaajana toimi professori Mikko Malaska.

Kiitän kandidaatintyön ohjaajaa ja tarkistajaa professori Mikko Malaskaa työn ohjauksesta. Haluan kiittää myös opiskelukavereitani, jotka ovat jakaneet ajatuksia ja kokemuksia kanssani prosessin aikana.

Tampereella, 20.3.2018

Reetta Kalliovalkama

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Työn tausta .....	1
1.2	Työn tavoite ja tutkimusmenetelmät .....	1
1.3	Työn rakenne .....	1
2.	PUUN PALAMINEN .....	3
2.1	Puun hiiltyminen ja hiiltymisnopeus .....	3
2.2	Palaminen yhdeltä tai useammalta sivulta .....	5
2.3	CLT-elementtien hiiltyminen .....	6
3.	LEVYTYSMATERIAALIEN OMINAISUUDET PALOSSA .....	8
3.1	Kipsilevy .....	8
3.2	Vaneri .....	10
4.	PUUN PALOSUOJAUS LEVYTYKSELLÄ .....	11
4.1	Levytyksen toiminta tulipalon aikana .....	11
4.2	Puun hiiltyminen levytyksen takana .....	12
4.3	Puun hiiltyminen levytyksen pettämisen jälkeen .....	13
4.4	Yksi tai useampi levykerros .....	13
4.5	Levytyksen vaikutus CLT-elementin hiiltymiseen .....	14
5.	LEVYILLÄ SUOJATUN PUURAKENTEEN HIILTYMÄN MÄÄRITTÄMINEN POLTTOKOKEELLA .....	17
5.1	Polttokoe .....	17
5.2	Hiiltymisen määrittäminen polttokokeella .....	18
6.	YHTEENVETO .....	19
	LÄHTEET .....	20

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\beta$	Hiiltymisnopeuden mitoitusarvo
CLT	Cross Laminated Timber, ristiinliimattu puuelementti, koostuu toisiinsa ristiinliimatuista lamelli- ja puulevykerroksista
$d_{\text{char}}$	Hiiltymissyvyys
$t_a$	Ajankohta, jossa suojatun puun hiiltymisnopeus palaa puun tyypilliseen hiiltymisnopeuteen
$t_{\text{ch}}$	Puun hiiltymisen alkamisajankohta
$t_f$	Levysuojauksen pettämisajankohta

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Ekologisuuden ja vihreiden arvojen merkitys kiinteistöjen omistajille ja käyttäjille on kasvussa. Puun käyttö rakennusmateriaalina on keino hyödyntää uusiutuvia raaka-aineita. Lisäksi puutoimiala on yksi Euroopan yhteiskunnallisten, taloudellisten ja ympäristöstrategioiden tärkeimmistä edistäjistä (VTT 2010, s.2).

Usein rakennusmateriaalia valitessa rakennuksen turvallisuus ja kustannukset ovat kuitenkin painavampia tekijöitä kuin ekologisuus ja hiilijalanjälki. Kaikkien rakennusten on täytettävä tietyt lujuus- ja turvallisuuskriteerit ja yleensä valitaan materiaali, jolla kriteerit täyttyvät edullisimmin. Monet materiaalit, kuten betoni, saavuttavat vaadittavat paloturvallisuusominaisuudet edullisemmin ja vähemmällä materiaalmäärällä kuin puurakenteet.

## 1.2 Työn tavoite ja tutkimusmenetelmät

Puurakenteiden palokäyttäytymistä on tutkittu eri puolilla maailmaa ja on kehitetty uusia palosuunnittelumenetelmiä ja -malleja. (VTT 2010, s.3) Tässä kandidaatintyössä tutkitaan levytyksellä suojaamisen vaikutusta puurakenteiden paloturvallisuusominaisuuksiin. Aihetta on tutkittu esimerkiksi Ruotsissa ja Kanadassa.

Tämä työ tehdään kirjallisuustutkimuksena, jonka pohjana käytetään ulkomailla tehtyjä tutkimuksia puun palosuojauksesta levytyksen avulla. Kandidaatintyön päätutkimuskysymys on, mitä hyötyä puurakenteen palosuojauksesta levytyksellä on. Tutkimuskysymykseen lähdetään vastaamaan tarkastelemalla puun hiiltymisominaisuuksien avulla. Tärkeinä ominaisuuksina pidetään hiiltymisen alkamisajankohtaa ja hiiltymisnopeutta. Mitä myöhäisempään ajankohtaan hiiltymisen alkaminen ajoittuu, sitä parempi palonkestävyys rakenteella yleensä saavutetaan.

## 1.3 Työn rakenne

Työn koostuu johdannon ja yhteenvedon lisäksi neljästä luvusta. Aluksi käsitellään puun erilaisia ominaisuuksia palotilanteessa. Sen jälkeen luvussa 3 perehdytään erilaisten levytysten ominaisuuksiin ja kerrotaan, miksi levytysmateriaalit sopivat käytettäväksi palosuojauksessa. Luvussa esitellään kaksi eri levytysmateriaalia. Luvussa 4 käsitellään levytyksen toimintaa palon aikana sekä esitetään, miten levytys parantaa puurakenteen kes-

tävyyttä. Toisin sanoen luvussa 4 yhdistetään lukujen 2 ja 3 materiaalit ja tiedot ja selvitetään yhteistoiminnan hyödyt ja haitat. Ennen yhteenvetoa luvussa 5 esitellään polttkoemenetelmä. Polttkoemenetelmän avulla selvitetään hiiltymisnopeuksia ja -syvyyksiä erimateriaaleille. Monet tämän kandidaatintyön lähteet ovat polttokokeiden tulosraportteja.

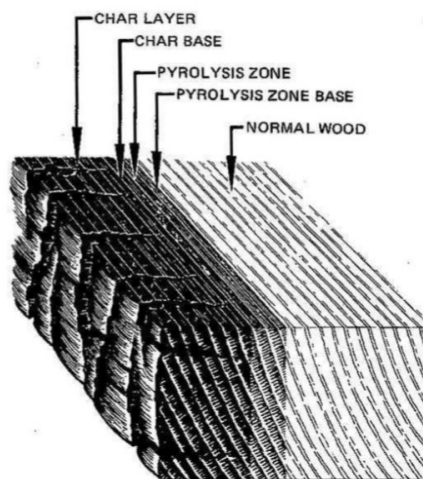
CLT-elementit, eli ristiinliimatut puuelementit, käsitellään erikseen, sillä sen ominaisuudet eroavat merkittävästi muista tunnetummista puumateriaaleista. Monissa testeissä CLT:n kestävyysominaisuudet ovat osoittautuneet kilpailukykyisiksi myös betoni- ja teräsrakenteisiin verrattuna. Luvussa 2.3 käsitellään CLT:n ominaisuuksia ja luvussa 4.5 levytyksen suojausvaikutusta CLT-elementteihin. CLT on melko uusi rakennusmateriaali etenkin Suomessa ja se on kasvattanut puurakentamisen osuutta uudisrakentamisessa.

## 2. PUUN PALAMINEN

Puu on luonnonmateriaali, eikä sen käyttäytymistä palossa voida täysin varmasti ennustaa. Useiden tutkimusten perusteella voidaan kuitenkin tehdä suunnittelun mahdollistavia oletuksia. Palotilanteessa puu reagoi tulen kanssa ja alkaa hiiltä. Hiiltymisen oletetaan alkavan, kun lämpötila on noussut 300 °C: seen (RIL 205-2-2009, s.22). Hiiltymisen voi kuitenkin alkaa ennen kyseistä lämpötilaa esimerkiksi suuren happipitoisuuden takia (Tiso 2014, s.19). Puurakenteiden mitoitusta toteutetaan Suomessa Eurokoodin SFS-EN 1995-1-2 sekä sen kansallisen liitteen (Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1995-1-2 (2016)) mukaisesti.

### 2.1 Puun hiiltymisen ja hiiltymisnopeus

Puu hiiltyy altistuessaan palolle. Hiiltymisen on puun oma mekanismi suojaautua palotilanteesta, sillä hiiltynyt osa puusta suojaa puun sisempiä osia. Hiiltynyt kerros estää hapen pääsyn syvemmälle puuhun ja hidastaa näin palon ja hiiltymän etenemistä. Hiiltymätön osa puusta säilyttää lujuusominaisuutensa. Kuva 2.1 havainnollistaa puun kolmea kerrosta palotilanteessa. Uloimpana on hiiltynyt kerros, keskellä pyrolyysikerros ja sisimpänä tavallinen palamaton puu (Tiso 2014, s.20). Pyrolyysillä tarkoitetaan kemiallista reaktiota, jossa orgaanista ainesta hajotetaan kuumentamalla ilman hapen osallistumista reaktioon.



**Kuva 2.1:** Puun hiiltymisen eri vaiheet puupoikkileikkauksessa. Kerrokset vasemmalta oikealle: hiiltynyt kerros, hiiltymisen raja, pyrolyysikerros, pyrolyysin raja ja reagoimaton puu. (Tiso 2014, s.20)

Koska palamattoman puun osuus pienenee palon edetessä, kuorman suuruus, jonka puuelementti pystyy palotilanteessa kantamaan, pienenee. Lopulta puuelementti menettää



kantavuutensa liian suuren kuorman alla. Puun palonkestoluokka riippuu siitä, kuinka kauan puurakenteen voidaan olettaa kestävän palotilanteessa. Esimerkiksi paloluokan R15 rakenteen oletetaan säilyttävän kantavuutensa 15 minuuttia ollessaan altistettu määräysten mukaiselle standardipalorasitukselle. Rakenteita mitoitettaessa tarkistetaan tapauskohtaisesti, että asetettuun palonkestoajatvaatimukseen saakka puupoikkileikkauksella on riittävä tehollinen poikkileikkaus ja kestävyys palotilanteen kuormituksista aiheutuviin rasituksiin verrattuna

Hiiltymisnopeus oletetaan ajasta riippumattomaksi vakioarvoksi (RIL 205-2-2009, s.22). Hiiltymisnopeudet ovat elementissä käytetystä puusta riippuvaisia. Taulukossa 2.1 on esitetty hiiltymisnopeuksien mitoitusarvoja eri puumateriaaleille.

**Taulukko 2.1:** Hiiltymisnopeuden mitoitusarvot. Mitoitusarvoa  $\beta_0$  käytetään, kun puuelementti palaa vain yhdeltä sivulta, ja arvoa  $\beta_n$  käytetään, kun puuelementti palaa useammalta sivulta. (SFS-EN 1995-1-2 :2004+ AC, s.44)

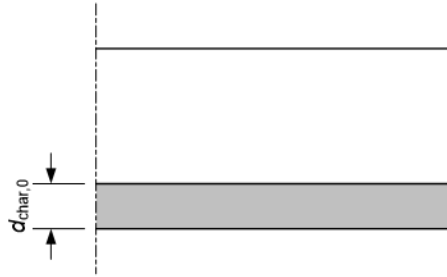
	$\beta_0$ mm/min	$\beta_n$ mm/min
<b>a) Havupuu ja pyökki</b>		
Liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Sahatavara, jonka ominaistiheys $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
<b>b) Lehtipuu</b>		
Lehtipuusta valmistettu sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys on $290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Lehtipuusta valmistettu sahatavara tai liimapuu, jonka ominaistiheys $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55
<b>c) LVL, jonka ominaistiheys on <math>\geq 480 \text{ kg/m}^3</math></b>	0,65	0,7
<b>d) Levyt ja lautaverhoukset</b>		
Lautaverhoukset	0,9 <sup>a</sup>	—
Vaneri	1,0 <sup>a</sup>	—
Muut puulevyt kuin vaneri	0,9 <sup>a</sup>	—
<sup>a</sup> Arvot pätevät, kun ominaistiheys on $450 \text{ kg/m}^3$ ja levyn paksuus on 20 mm; ks. kohtaa 3.4.2(9) tiheyden tai paksuuden poiketessa näistä arvoista.		

Mitä pienempi taulukon 2.1 arvo on, sitä vähemmän hiiltymistä tapahtuu minuutissa. Taulukon mukaan huomataan, että lehtipuusta valmistettu sahatavara, jonka ominaistiheys on suuri, on hiiltymisnopeutensa perusteella paloturvallisin puu rakennusmateriaalina. Koska puu on luonnon materiaali, arvot eivät vastaa täysin todellisuutta, mutta ovat riittävän tarkkoja suunnittelun mahdollistamiseksi.

Hiiltymisnopeus on erilainen kolmessa eri tilanteessa. Pinnoille, jotka altistetaan palolle suojaamattomina koko palorasituksen ajan, voidaan olettaa, että hiiltymisnopeus on materiaalille annetun hiiltymisnopeuden mitoitusarvon verran. Mikäli puu on suojattu levytyksellä ja hiiltyminen alkaa suojauksen takana, on puun hiiltymisnopeus mitoitusarvoa pienempi. Kun suojaava levytys pettää ja puurakenne altistuu palolle suojaamattomana, on puun hiiltymisnopeus jonkin aikaa mitoitusarvoa suurempi. Kun hiiltynyt kerros saavuttaa 25 mm paksuuden, pienenee hiiltymisnopeus takaisin mitoitusarvoon. (RIL 205-2-2009, s.24)

## 2.2 Palaminen yhdeltä tai useammalta sivulta

Rakenteesta riippuen puurakenne voi altistua palolle yhdeltä tai useammalta sivulta, jolloin hiiltymisen tapahtuu eri tavalla. Jos rakenne on tasomainen, esimerkiksi lattia- tai seinälaatta, puun oletetaan palavan vain yhdeltä sivulta (RIL 205-2-2009, s.22). Yhdeltä sivulta hiiltymisen on havainnollistettu kuvassa 2.2. Kyseisessä tilanteessa puu hiiltyy palolle alttiilta puolelta vakio hiiltymisnopeudella  $\beta_{char}$  taulukon 2.1 mukaisesti. Hiiltymissyvyys  $d_{char}$  riippuu ajasta, jonka puu on palolle alttiina. (Bregulla et al. 2010, s.81)



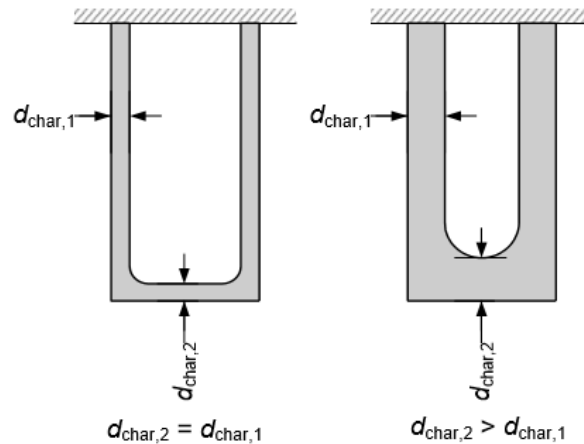
**Kuva 2.2:** Hiiltymisen tapahtuu yhdeltä sivulta (Bregulla et al. 2010, s.82).

Hiiltymissyvyyden mitoitusarvo  $d_{char}$  lasketaan kaavalla

$$d_{char} = \beta t,$$

missä  $t$  on palorasitukselle altistettu aika, ja  $\beta$  on hiiltymisnopeuden mitoitusarvo. (SFS-EN 1995-1-2 :2004+ AC, s.40) Yksidimensionaalisessa palossa käytetään arvoa  $\beta_0$ . Rakenteen hiiltyessä useammalta sivulta käytetään arvoa  $\beta_n$ .

Palkit ja pilarit, joiden poikkileikkaukset ovat suorakaiteen muotoisia, altistuvat palolle useammalta sivulta (RIL 205-2-2009, s.23). Tällöin on sivujen hiiltymisen lisäksi huomioitava kulmissa tapahtuva pyöristymisen. Puu hiiltyy kulmista hieman enemmän kuin sivuilta, sillä nurkat altistuvat palolle kahdesta suunnasta, kuten kuvassa 2.3 näkyy. Kuvan 2.3 palkki hiiltyy kolmelta sivulta, sillä välipohjalaatta suojaa palkin yläpintaa.



**Kuva 2.3:** Puupoikkileikkauksen hiiltyminen, kun rakenne on altistettu palolle kolmelta sivulta. Elementin eri sivuilla olevien hiiltemissyvyysien ollessa erisuuruiset hiiltemisessä tapahtuu enemmän pyöristystä. (Bregulla et al. 2010, s.83)

Kuvan 2.3 oikeanpuoleinen tilanne, jossa sivujen hiiltemissyvyys ovat erisuuruiset, syntyy, kun poikkileikkauksen eri sivujen altistusajat ovat erilaiset. Tilanne on mahdollinen, kun palo alkaa palkin yhden sivun puolella. Hiiltyminen alkaa muiltakin sivuilta, kun palo on levinnyt lähemmäksi palkkia.

## 2.3 CLT-elementtien hiiltyminen

CLT:n eli ristiinliimatun puuelementin käyttö on lisääntynyt sen hyvien ominaisuuksien ansiosta. CLT-elementeillä on hyvät rakennetekniset, lämmönkestävyys- ja akustiset ominaisuudet (Tiso 2014, s.16). Elementit voidaan tehdä hyvin pitkälle valmiiksi tehtaissa, mikä helpottaa työtä työmaalla ja vähentää esimerkiksi kosteusongelmien syntymistä rakennusvaiheessa. CLT-elementit voidaan tehdä varta vasten tiettyä kohdetta varten, ja mahdollisia paksuus- ja kerrosyhdistelmiä on lukemattomia. Elementtien suurista yhdistelmävaihtoehdoista johtuen esimerkiksi tiettyjen paloturvallisuusominaisuuksien asettaminen on hankalaa. Kaikkien eri yhdistelmien testaaminen on monimutkaista ja kallista, eikä standardeja siksi vielä ole kaikille yhdistelmille. (Tiso 2014, s.16)

CLT-elementin palonkestävyys riippuu useasta tekijästä. Keskeisimmät palo-ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät ovat puuelementissä olevien rakennekerrosten määrää sekä elementin kokonaispaksuus. Lisäksi elementissä käytetty liima ja elementin käyttö lattia- tai kattorakenteena vaikuttavat CLT-elementin palo-ominaisuuksiin. (Tiso 2014, s.16) Aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että liimaamalla useasta kerroksesta koottujen puuelementtien palonkestävyyksissä on heikkouksia. Kun palon puoleinen kerros hiiltyy, se putoaa pois, eikä jää suojaamaan sisempiä puukerroksia (Tiso 2014, s.27). CLT-elementin kerrokset suojaavat alempia kerroksia samalla tavalla kuin esimerkiksi kipsilevy takanaan olevaa puurakennetta. CLT-rakenne ei hiilly tasaisella mitoitussarvon mukaisella

nopeudella, vaan ensimmäisen kerroksen hiililtyä ja pudottua pois takana oleva kerros alkaa hiiltä mitoitusarvoa suuremmalla hiiltymisnopeudella.

CLT-elementeille on olemassa arvioita hiiltymisnopeuden mitoitusarvoiksi. Willinder (2009) suoritti polttokokeita useille CLT-palkeille ja sai erilaisia hiiltymisnopeuksia riippuen palkille kohdistuvan kuorman määrästä ja palolle altistuvasta puolesta. Kun paloaltistus kohdistettiin taivutetun palkin vetorasitetun pinnan puolelle, palosuojaamattoman CLT-palkin hiiltymisnopeus vaihteli välillä 0,53-0,83 mm/min. Kun palkki altistettiin palolle puristuspuolelta, hiiltymisnopeus pysyi lähes vakiona arvolla 0,65 mm/min. Palkin altistuessa palolle vedon puolelta, kuorman suuruudella on testin mukaan suurempi vaikutus hiiltymisnopeuteen kuin palkin altistuessa palolle puristuspuolelta.

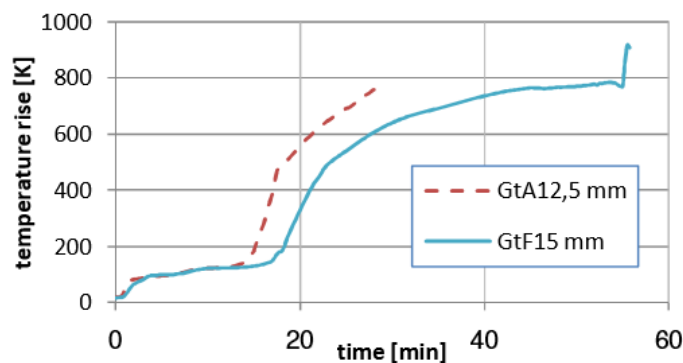
### 3. LEVYTYSMATERIAALIEN OMINAISUUDET PALLOSSA

Erilaiset levytysmateriaalit käyttäytyvät eri tavoin palotilanteessa. Jotkin materiaalit palavat ja toiset eivät osallistu paloon ollenkaan. Levytysmateriaalin ominaisuudet on tiedettävä, jotta osataan valita tilanteeseen sopiva levytysvaihtoehto.

#### 3.1 Kipsilevy

Kipsi on suuren vesipitoisuutensa takia palamaton materiaali eikä osallistu paloon. Kipsilevyt tehdään vedestä ja kalsiumsulfaattijauheesta, ja palaessaan levyt vapauttavat itseensä sitoutuneen veden. Kipsin voidaan ajatella toimivan rakennuksen sisäänrakennettuna sprinklerinä. (Just et al. 2010, s.7,9)

Palotilanteessa kipsilevyn vesi alkaa höyrystyä lämpötilan saavuttaessa vähintään 80 °C lämpötilan. Veden höyrystyessä lämpötila kipsilevyssä tai sen takana ei pääse nousemaan veden höyrystymislämpöä, 100 °C:ta, korkeammaksi. Kun kaikki vesi on höyrystynyt, lämpötila pääsee jatkamaan nousuaan. (Just et al. 2010, s.9) Veden höyrystymisaika riippuu esimerkiksi kipsilevyn paksuudesta ja tyypistä. Kuvaajassa 3.1 on nähtävissä kipsilevyn lämpötilan nousu ajan suhteen, kun levyä on testattu standardipalokäyrän mukaisesti.



**Kuva 3.1:** Kipsilevyn lämpötilakehitys polttokokeen aikana. Levyssä olevan veden vaikutuksesta levyn lämpötila nousee hyvin hitaasti ensimmäisen 15 minuutin aikana. Kuvaajassa GtA12,5 mm tarkoittaa 12,5 mm paksuista tavallista kipsilevyä ja GtF15 mm tarkoittaa 15 mm paksuista palonsuojakipsilevyä. (Just et al. 2010, s.9)

Kuvan 3.1 lämpötilakehityksessä näkyy ensimmäisten 15 minuutin aikana hyvin tasainen vaihe, jonka aikana kipsilevyssä oleva vesi höyrystyy. Höyrystyminen hidastaa levyn

lämpötilan nousua. Paksummalla palokipsilevyllä tasainen alue on pidempi, kun ohuemalla tavallisella kipsilevyllä. Mitä pidempi höyrystymisaika on, sitä parempi palonkestävyys kipsilevyllä on ja sitä paremmin se suojaa takanaan olevaa rakennetta.

Palosuojauksessa käytetään pääosin kahta eri kipsilevyä, tavallista kipsilevyä ja palokipsilevyä. Palokipsilevy on nimensäkin mukaan parempi palosuojakseen kuin tavallinen kipsilevy.

Eurokoodin SFS-EN 1995-1-2 kohta 3.4.3.4 esittää vain vähän ohjeita kipsilevyjen murtohetken määrittämiseksi. Suomen rakennuskohteiden suunnittelussa voidaan soveltaa Suomen rakentamismääräyskokoelman osaa Rakenteiden lujuus ja vakaus, Puurakenteet 2016. Taulukossa 3.1 on esitetty levyjen murtohetkien arvoja eri kipsilevyille ja levy-yhdistelmille. Taulukon arvot ovat kansallisia valintoja, joita sovelletaan kaikkien kipsilevyvalmistajien tuotteille. (Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1995-1-2 2016)

**Taulukko 3.1:** Murtohetkien arvoja eri levyille ja levy-yhdistelmille. (Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1995-1-2 2016)

Levytyys	$t_{ch}$	$k_2$	$t_f$	$k_3^{1)} / k_3^{2)}$
	<i>min</i>		<i>min</i>	
A	10	-	10	3,0 / 4,0
2 x A <sup>3)</sup>	30	-	30	3,0 / 4,0
A + F <sup>3,4)</sup>	40	0,85	45	3,8 / 5,0
F <sup>4)</sup>	15	0,85	30	3,8 / 5,0
2 x F <sup>4)</sup>	60	0,85	> 60	-
PI + F <sup>4,5)</sup>	40	0,85	45	4,0
PI + A <sup>3,5)</sup>	30	-	30	3,0

<sup>1)</sup> Jos eriste on kannatettu niin, että kannattajien pystysivuissa ei hiiltymää  
<sup>2)</sup> Jos eriste on kannatettu teräsprofiileilla tai puusoiroilla tai kanaverkolla (pystysivut eivät täysin hiiltymättömät)  
<sup>3)</sup> A-levy 13 mm paksu kipsilevy  
<sup>4)</sup> F-levy 15 mm paksu palokipsilevy  
<sup>5)</sup> PI-levy 12 mm paksu vaneri tai muu puulevy. Mikäli vanerin tai puulevyn paksuus d on suurempi kuin 12 mm, lisätään taulukon  $t_{ch}$ - ja  $t_f$ -arvoja määrällä  $\Delta t$ , kun  $\Delta t = (d - 12) / \beta_0$ .

Palokipsilevyn ydin on tehty tiiviimmäksi kuin tavallisen kipsilevyn huokoinen ydin, paremman lämpötilan kestävyuden saavuttamiseksi. Usein palokipsilevyt sisältävät lisäksi lasikuituja, jotka rajoittavat kipsilevyn kutistumista ja aiheuttaa suurien halkeamien sijasta pienien halkeamien verkoston. Lasikuidun tehtävä on pitää levy kasassa jonkin aikaa sen jälkeen, kun kipsissä oleva vesi on haihtunut ja näin siirtää levyn murtohetkeä myöhäisempään ajankohtaan. Tästä johtuen palokipsilevy suojaa takanaan olevaa rakennetta pidempään kuin tavallinen kipsilevy. (Just et al. 2010, s.8)

### 3.2 Vaneri

Vaneri, kuten muutkin puumateriaalit, osallistuu paloon. Vaneri hiiltyy ja suojaa takanaan olevia rakenteita, kunnes putoaa pois paikoiltaan. Vanerilla on useita palamattomia materiaaleja paremmat palotekniset ominaisuudet, sillä sen mittamuodonmuutokset lämpötilan muuttuessa ovat erittäin pienet. Vanerin on tutkittu syttyvän liekkien vaikutuksesta 270 °C lämpötilassa ja itsestään ilman liekkejä 400 °C lämpötilassa. (Metsäteollisuus ry 2005, s.25) Vaneri syttyy siis standardien oletussyttymislämpötilaan 300 °C korkeamassa lämpötilassa ja tyypillistä puurakennetta myöhemmin

Vanerin murtohetki voidaan ennustaa hyvin puumateriaaleille määritettyjen hiiltymisnopeuksien mitoitusarvojen avulla Vanerilevytyksen murtumishetki palossa riippuu levyn paksuudesta ja yksidimensioisen hiiltymisen hiiltymisnopeuden mitoitusarvosta  $\beta_0$ . (SFS-EN 1995-1-2+AC, s.44) Vanerilevyille, jonka paksuus on 20 mm ja tiheys 450 kg/m<sup>3</sup>, hiiltymisnopeuden mitoitusarvo on taulukon 2.1 mukaan 1,0 mm/min. Vanerin murtohetken arvona voidaan käyttää myös Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaista arvoa, joka on esitetty taulukossa 3.1. Vanerin palonkestävyyttä voidaan parantaa erilaisilla palonsuojaukskemikaaleilla tai palonkestävillä kalvoilla (Metsäteollisuus ry 2005, s.25). Myös vanerissa käytetyllä liimalla on vaikutusta vanerin paloteknisiin ominaisuuksiin.

Palosuojauksen kannalta vanerilla on hyviä ja huonoja ominaisuuksia. Vaneri kestää suhteellisen hyvin paloa, mutta korkeahkon syttymis- ja palamislämpötilan takia lämpötila vanerilevyn takana nousee myös korkeaksi. Vaneri voi siirtää hiiltymisen alkamisajan kohtaa huomattavasti, mutta palon päästessä levyn takana olevaan puurakenteeseen, hiiltymisen alkaa hiiltymisnopeuden mitoitusarvoa suuremmalla nopeudella. Vanerin palosuojausominaisuuteen vaikuttaa myös vanerin lämmönjohtavuus. Vanerin lämmönjohtavuus riippuu vanerilevyn kosteudesta. Mitä kosteampi vaneri on, sitä paremmin vaneri johtaa lämpöä ja sitä huonommin vaneri suojaa takanaan olevaa rakennetta. (Metsäteollisuus ry 2005, s.25)

## 4. PUUN PALOSUOJAUS LEVYTYKSELLÄ

Levytyksen käytössä puun palosuojauksessa on hyvät ja huonot puolensa. Levytys on suunniteltava ja mitoitettava oikein, jotta suojauksen hyödyt ovat suuremmat kuin levytyksestä aiheutuvat haitat. Levytyksen tärkein ominaisuus palosuojauksessa on pitkittää puun hiiltymisen alkamisajankohtaa  $t_{ch}$ .

### 4.1 Levytyksen toiminta tulipalon aikana

Levytys suojaa takanaan olevaa rakennetta palolta estämällä liekkien ja kuumuuden pääsyn rakenteeseen. Levytys voi suojata puuta hiiltymiseltä, kunnes levy on hajonnut kokonaan. Hiiltymisen voi myös alkaa levyn takana levyn vielä ollessa ehjä. Levytyksen suojausvaikutuksen oletetaan pettäneen, kun levytyksestä 1 % on murtunut. Tämän jälkeen koko suojauksen pettäminen tapahtuu hyvin pian. (Just et al. 2010, s.11) Levytyksen murtumisen jälkeen puun hiiltymisen alkaa suuremmalla nopeudella, kun mitä puu hiiltyy täysin suojaamattomana. Hiiltymisnopeus on levytyksellä suojatuilla rakenteilla suurempi heti suojauksen pettämisen jälkeen, sillä puun lämpötila voi olla tässä vaiheessa korkeampi kuin 300 °C.

Erilaisten levytysten vaikutuksia puun hiiltymisen alkamiseen on tutkittu. Taulukkoon 4.1 on koottu hiiltymisen alkamisajankohtia joillekin levytysratkaisuille ja rakenteille.

**Taulukko 4.1:** Levytyksellä palosuojattujen rakenteiden hiiltymisen alkamisajankohtia (Puuinfo 2013, s.2)

PALOSUOJAUKSEEN KÄYTETTÄVÄ TUOTE		PILARI TAI PALKKI	SEINÄ <sup>a)</sup>	VÄLIPOHJA <sup>a)</sup>
Sauma ≤ 2 mm	Paksuus [d]	$t_{ch}$	$t_{ch}$	$t_{ch}$
Kipsilevy (EN 520) (Tyyppi H)	9 mm	11 min	10 min	-
Kipsilevy (EN 520) (Tyyppi A)	13 mm	22 min	15 min	10 min
Palokipsilevy (EN 520) (Tyyppi F)	15 mm	28 min	20 min	15 min
2x Kipsilevy (EN 520) (Tyyppi H)	9 mm + 9 mm	23 min	-	-
2x Kipsilevy (EN 520) (Tyyppi A)	13 mm + 13 mm	40 min	40 min	30 min
2x Palokipsilevy (EN 520) (Tyyppi F)	15 mm + 15 mm	61 min	≥ 60 min	60 min
Kipsilevy (EN 520) + Palokipsilevy <sup>b)</sup> (EN 520) (Tyyppi F)	13 mm + 15 mm	46 min	55 min	40 min
Puulevy (EN 313-1, EN 309, EN 316, EN 300) + Kipsilevy <sup>b)</sup> (EN 520) (Tyyppi A)	12 mm + 13 mm	-	40 min <sup>c)</sup>	30 min
Puulevy (EN 313-1, EN 309, EN 316, EN 300) + Palokipsilevy <sup>b)</sup> (EN 520) (Tyyppi F)	12 mm + 15 mm	-	55 min <sup>c)</sup>	40 min

<sup>a)</sup> Rankarakenne, jonka ontelotila voi olla eristeellä täytetty tai eristeetön.

<sup>b)</sup> Kyseinen levy palon puolella.

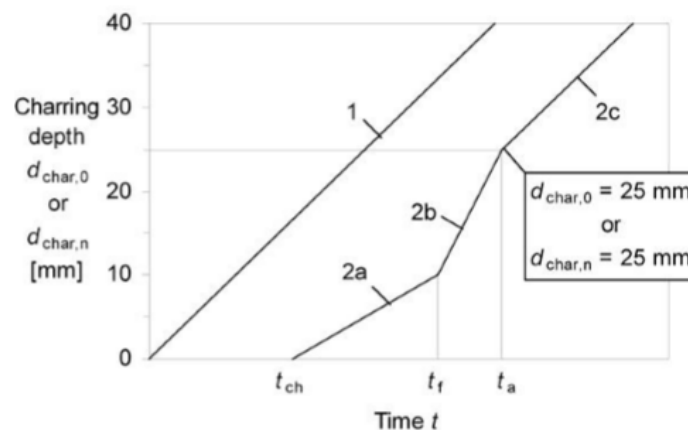
<sup>c)</sup> Mikäli puulevy on paksumpi kuin 12 mm, voidaan arvoa korottaa määrällä  $\Delta t = (d - 12 \text{ mm}) / \beta_0$ .



Kuten taulukosta 4.1 huomataan, palolle altistumisajan ja levytyksen paksuuden lisäksi hiiltymisen alkamisajankohta riippuu tarkasteltavasta rakenteesta. Välipohjille hiiltymisen alkamisajankohdat ovat lyhyempiä kuin seinille maanvetovoiman vaikutuksesta. Tuli pääsee vaikuttamaan paremmin vaakarakenteisiin kuin pystyrakenteisiin. Myös levytykset pettävät nopeammin lattiarakenteissa kuin seinärakenteissa (Just et al. 2010, s.16).

## 4.2 Puun hiiltyminen levytyksen takana

Puu alkaa hiiltä ehtyä levytyksen takana, mikäli lämpötila nousee hiiltymislämpötilaan 300 °C. Hiiltymisen alkaessa levytyksen ollessa vielä ehjä, hiiltymisen tapahtuu hitaammin kuin suojaamattomalla puuelementillä. Suojaamattoman puuelementin hiiltymisnopeus on vakio. Kun suojaus pettää, puu hiiltyy nopeammin kuin suojaamaton puu, kunnes saavuttaa 25 millimetrin hiiltymissyvyyden tai vastaavan palosuojaamattoman rakenteen hiiltymissyvyyden, sen mukaan kumpi on pienempi (RIL 205-2-2009, s.24). Tämän jälkeen hiiltymisnopeus palaa noudattamaan puulle ominaista hiiltymisnopeutta. Tilanne on esitetty kuvassa 4.1.



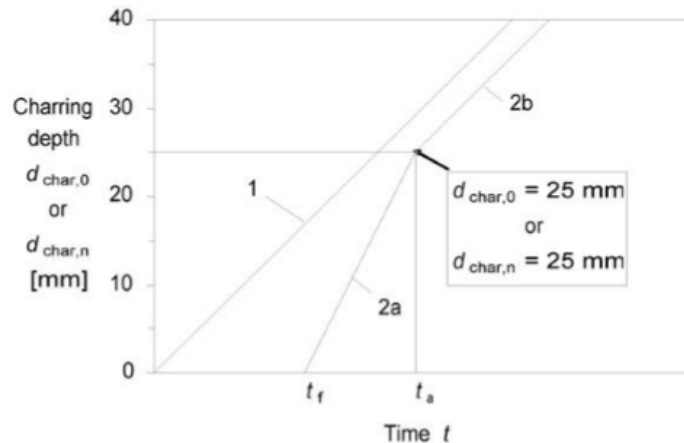
**Kuva 4.1:** Hiiltymisnopeuden kuvaaja, kun hiiltyminen alkaa ennen kuin suojaus pettää. Käyrä 1 kuvaa suojaamatonta puuta ja käyrä 2 puuta, joka on suojattu levytyksellä. (Tiso 2014, s.26)

Kuvaajan 4.1 kohta 2a kuvaa hidasta hiiltymistä ennen kuin suojaus pettää ja kohta 2b kuvaa nopeampaa hiiltymistä suojauksen pettämisen jälkeen. Kohdassa 2c puun hiiltymisnopeus on palannut mitoitusarvon mukaiseen nopeuteen. Kuvaajan pystyakselilla on hiiltymissyvyys ja vaaka-akselilla palolle altistunut aika.

Puun hiiltymisen levytyksen takana johtuu lämpötilan noususta, sillä liekit eivät pääse levytykseen taakse. Tämä tarkoittaa sitä, että levytyksen takana hiiltymä puu palaa pyrolyysivaiheen mukaisesti.

### 4.3 Puun hiiltymisen levytyksen pettämisen jälkeen

Puun hiiltymisen levytyksen takana ei ala ennen kuin hiiltymislämpötila on saavutettu. Kun levytyksen suojausvaikutus pettää ennen kuin levyn takana on saavutettu 300 °C:n lämpötila, puun hiiltymisen alkamisajankohta  $t_{ch}$  on sama kuin levytyksen pettämisaikankohta  $t_f$ . Hiiltymisnopeus on vakioarvoa suurempi, kunnes hiiltymisen on saavuttanut 25 mm syvyyden tai vastaavan palosuojaamattoman rakenteen hiiltymissyvyyden (RIL 205-2-2009, s.24). Tilanne on esitetty kuvassa 4.2.



**Kuva 4.2:** Hiiltymisnopeuden kuvaaja, kun hiiltyminen alkaa suojauksen petettyä. (Tiso 2014, s.26)

Kuvaan 4.2 ei ole merkitty erikseen hiiltymisen alkamisajankohtaa, mutta ajankohta on sama kuin suojauksen pettämisaikankohta  $t_f$ . Hiiltyminen alkaa suuremmalla hiiltymisnopeudella levytyksen petettyä, sillä lämpötila on todennäköisesti saavuttanut yli 300 °C:een lämpötilan liekkien puolella. Korkeampi lämpötila ja liekkien pääsy puurakenteeseen aiheuttaa nopeampaa hiiltymistä, kunnes suojaamattoman puun tai 25 mm hiiltymissyvyys on saavutettu.

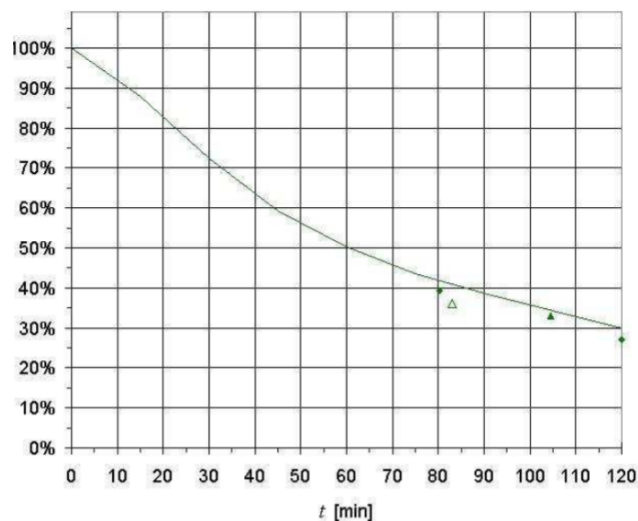
### 4.4 Yksi tai useampi levykerros

Levykerroksia voidaan laittaa puurakenteen pintaan myös useampia kuin yksi. EN 1995-1-2 (2004) antaa ohjeet kahdella kipsilevyllä suojaamiseen. Kipsilevyt toimivat eri tavalla pareittain kuin yksin. Mikäli rakenne suojataan kahdella tavallisella kipsilevyllä, oletetaan ulomman toimivan samalla tavalla kuin yksittäinen kipsilevy. Sisemmästä kipsilevystä huomioidaan vain puolet kipsilevyn paksuudesta. Sisemmän kipsilevyn ei voida olettaa suojaavan samaa aikaa kuin ulomman kipsilevyn, sillä osa sisemmän kipsilevyn vedestä haihtuu ulomman kipsilevyn ollessa vielä ehjä.

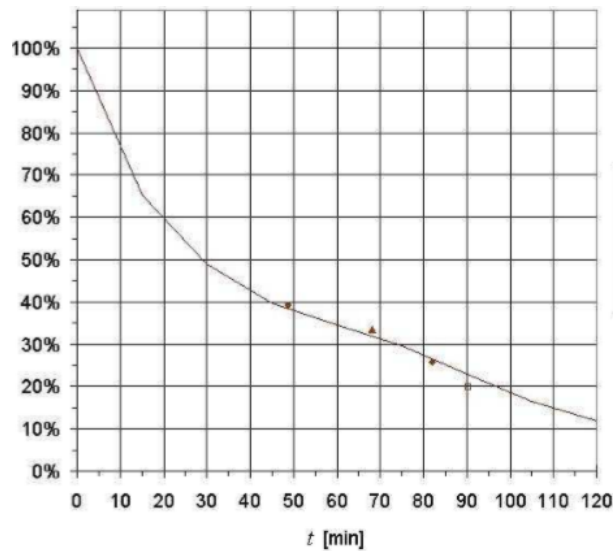
Kun rakenne suojataan kahdella erilaisellakipsilevyllä, pitää paremmin paloa kestävä asentaa ulommaiseksi (Just et al. 2010, s.13). Mikäli suojataan tavallisella ja palokipsilevyllä, tavallinen kipsilevy asennetaan sisemmäksi. Palokipsilevyn oletetaan toimivan palotilanteessa normaalisti ja sisemmästä kipsilevystä huomioidaan vain 80 % paksuudesta. Mikäli levyt asennetaan toisinpäin, niiden oletetaan toimivan kuin tavalliset kipsilevyt eikä palonsuojakipsilevyn hyötyjä saavuteta. (Just et al. 2010, s.12-13)

#### 4.5 Levytyksen vaikutus CLT-elementin hiiltymiseen

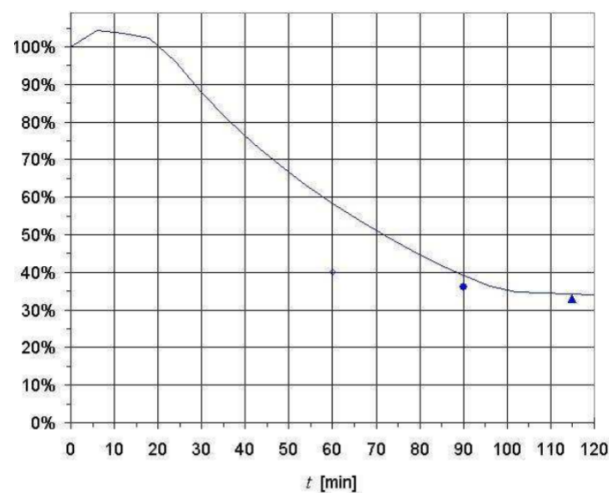
Willinder (2009) testasi levytyksellä suojaamisen vaikutusta CLT- palkin hiiltymisnopeuksiin. Kokeessa levytyksellä suojattu palkki altistettiin palolle palkin veto- tai puristuspuolelta ja kuormitettiin eri suuruisilla kuormilla. Suojatun CLT-palkin hiiltymisnopeus vaihteli välillä 0,03-0,42 mm/min. Palolle altistuvan puolen suojauksena käytettiin palokipsilevyä, jonka paksuus oli 15 mm. Kuvissa 4.3-4.6 on esitetty, miten CLT-palkin kantokyky pienenee hiiltymän edetessä ja palkin tehokkaan poikkileikkauksen pienentyessä polttokokeen aikana. Kuvissa yhtenäinen viiva esittää, miten palkkirakenteen kantokyky pienenee teoreettisten laskennallisten tulosten perusteella. Yksittäiset pisteet esittävät Willinderin tekemien polttokokeiden tulosten perusteella määritettyjä arvoja. Kuvissa pystyakselilla on palolle altistetun palkin kantavuuden suhde alkuperäisen palkin kantavuuteen ja vaaka-akselilla palolle altistuminen minuutteina.



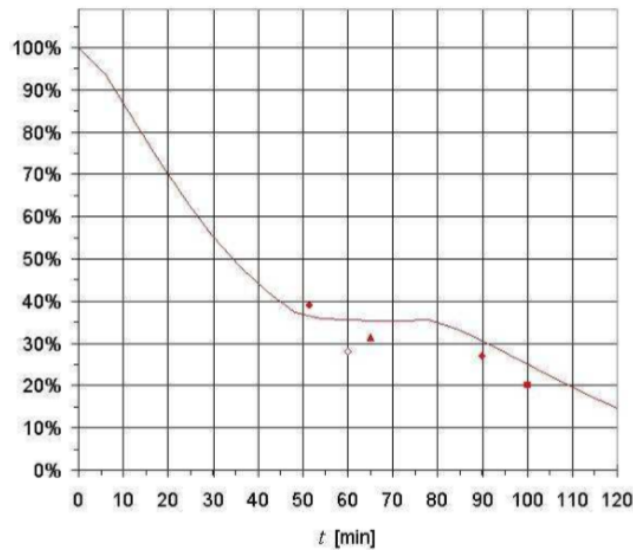
**Kuva 4.3:** CLT-palkin kantokyvyn heikkeneminen, kun kipsilevyllä palosuojattu palkki on altistettu palolle palkin purisetulta opuolelta. Kuvaajan pystyakselilla on palolle altistetun palkin kantavuuden suhde alkuperäisen palkin kantavuuteen [%.] (Willinder 2009, s.52)



**Kuva 4.4:** CLT-palkin kantokyvyn heikkeneminen, kun palosuojaamaton palkki on altistettu palolle palkin purisetulta opuoletta. Kuvaajan pystyakselilla on palolle altistetun palkin kantavuuden suhde alkuperäisen palkin kantavuuteen [%.] (Willinder 2009, s.51)



**Kuva 4.5:** CLT-palkin kantokyvyn heikkeneminen, kun kipsilevyllä palosuojattu palkki on altistettu palolle palkin vedetyltä puolelta. Kuvaajan pystyakselilla on palolle altistetun palkin kantavuuden suhde alkuperäisen palkin kantavuuteen [%.] (Willinder 2009, s.50)



**Kuva 4.6:** CLT-palkin kantokyvyn heikkeneminen, kun palosuojaamaton palkki on altistettu palolle palkin vedetyltä puolelta. Kuvaajan pystyakselilla on palolle altistetun palkin kantavuuden suhde alkuperäisen palkin kantavuuteen [%.] (Willinder 2009, s.49)

Kuvaajien muodoista huomataan, että elementin kantokyvyn muutoksissa on eroa riippuen siitä, onko palolle altistettu palkin pinta veto- vai puristusrasituksen alaisena. Kokeiden ja teoreettisten laskelmien perusteella palkki kestää paremmin vedetylle puolelle kohdistuvan palorasituksen kuin puristuspuolellepuolelle kohdistuvan. Kuvasta 4.6 huomataan, että palkin altistuessa palolle vedetyltä puolelta, palkki menettää puolet kantokyvystään suojaamattomana noin 35 min kuluttua palolle altistamisen jälkeen. Kipsilevyllä suojattuna palkin kantokyvyn puolittuminen kestää kuvaajan 4.5 mukaan 70 min. Palkin puristuspuolen altistuessa palolle, palkin kantokyvyn puolittuminen tapahtuu suojaamattomalla palkilla hieman alle 30 min kuluttua palolle altistumisen alkamisesta ja kipsilevyllä suojatulla palkilla 60 min kuluttua, kuten kuvista 4.3 ja 4.4 nähdään. (Willinder 2009, s.49-52) CLT-palkin palosuojaaminen kipsilevyllä vaikuttaa oleellisesti palkin kantavuuteen palotilanteessa.

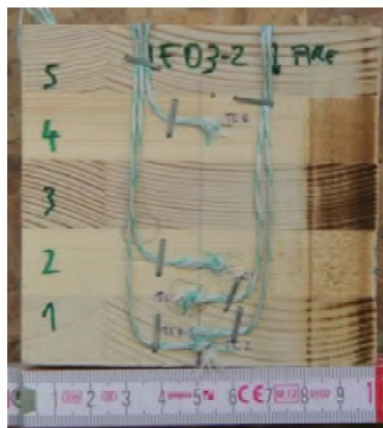
## 5. LEVYILLÄ SUOJATUN PUURAKENTEEEN HIILT- TYMÄN MÄÄRITTÄMINEN POLTTOKOKEELLA

Polttokokeilla tutkitaan rakenteiden palonkestävyyttä polttamalla tutkittavia materiaaleja. Polttokokeen avulla voidaan selvittää erilaisten rakennusmateriaalien hiiltymisnopeutta ja -syvyyttä palotilanteessa. Koe voidaan suorittaa yksittäisille elementeille kuten palkkeille tai rakennekokonaisuuksille kuten esimerkiksi hissikuilulle. Polttokokeen avulla voidaan myös selvittää levytyksen suojausvaikutus puurakenteeseen.

### 5.1 Polttokoe

Polttokoetta varten tutkittavasta materiaalista valmistetaan koekappale. Rakenne voi olla yksittäinen palkki tai kokonainen rakennuksen osa. Kokeen toistettavuuden kannalta helppointa on tutkia yksittäistä rakenneosaa kuten palkkia tai pilaria. Puurakenteita tutkittaessa kokeen toistettavuus on tärkeää, sillä puu on luonnonmateriaali eikä käyttäydy joka kerta täysin samalla tavalla. Kun puurakenteelle saadaan useiden kokeiden jälkeen samansuuntaisia tuloksia, voidaan luoda vahvoja arvioita puun käyttäytymisestä suunnittelun helpottamiseksi.

Polttokokeessa tutkittavaan koekappaleeseen asennetaan termopareja, jotta kappaleen lämpötilan muutosta voidaan seurata (Tiso 2014, s.39). Termopari on lämpötila-anturi, joka perustuu kahden eri metallin liitoksessa syntyvään, lämpötilasta riippuvaan jännitteeseen (Wexon 2018). Lämpötilan tarkkailun lisäksi kokeesta tehdään näköhavaintoja. Mikäli koetilannetta ei voi seurata näköetäisyydeltä, voidaan hyödyntää kameroita. Kuvassa 5.1 havainnollistetaan termoparien sijoittelua CLT-palkkiin.



**Kuva 5.1:** Esimerkki termoparien sijainneista CLT-palkin polttokokeessa (Tiso 2014, s.42)

Polttokoetta tehdessä on kirjattava ylös tapahtuvia muutoksia ja niiden tapahtuma hetki minuutteina polttamisen aloitushetkestä. Jotta tulosta voidaan analysoida, on tiedettävä mahdollisimman tarkkaan mitä on tapahtunut tietyn ajan kuluessa. Esimerkiksi havainnot savun alkamisesta ja määrästä kirjataan näköhavaintona tuloksiin (Tiso 2014, s. 43).

## 5.2 Hiiltymisen määrittäminen polttokokeella

Hiiltymissyvyyttä ja hiiltymisnopeutta ei voida suoraan nähdä kokeen aikana. Lopullinen koekappaleen hiiltymissyvyys voidaan määrittää kokeen loputtua esimerkiksi palkeista helposti. Kuvassa 5.1 havainnollistetaan polttokokeen lopuksi tarkasteltavan koekappaleen hiiltymissyvyyden mittaaminen. Jotta hiiltymissyvyys polttokokeen lopuksi voidaan määrittää, on tiedettävä koekappaleen mitat ennen kokeen aloittamista. Osa hiiltyneestä kerroksesta voi pudota koekappaleesta ennen kokeen loppumista varsinkin elementeistä, joissa useita kerroksia on yhdistetty liimalla.



**Kuva 4.1:** Koekappaleen lopullisen hiiltymissyvyyden määrittäminen polttokokeen jälkeen. CLT-palkista on kaksi palon puoleisinta kerrosta hiiltynyt lähes kokonaan. (M. Tiso 2014, s.52)

Hiiltymissyvyyttä kokeen aikana voidaan arvioida termoparien lämpötilojen avulla. Kun termoparin lämpötila on noussut 300 °C: seen, voidaan olettaa, että hiiltymistä tapahtuu termoparin syvyydellä. Jotta tällainen arviointi on mahdollista, on tiedettävä tarkalleen termoparien syvyydet.

## 6. YHTEENVETO

Puurakenteita suunniteltaessa on kiinnitettävä huomiota puun palonkestävyyteen. Puu reagoi palotilanteessa hiiltymällä. Hiiltynyt osa puusta menettää kantavuutensa. Laki sekä palomääräykset edellyttävät, että rakenteet kestävät sortumatta niille määräyksissä asetetun palonkestoajan. Puun pinnalle syntyvä hiiltynyt kerros suojaa kerroksen alla olevaa puuta palon vaikutuksilta. Hiiltynyt kerros estää liekkien ja hapen pääsyn syvemmälle puuhun ja hidastaa näin hiiltymissyvyyden kasvamista. Mikäli puurakennetta ei suojata millään tavalla, rakenteen palosuunnittelu perustuu puun ominaisuuksiin ja poikkileikkaukseen sekä sen hiiltymisnopeuden mitoitusarvoon.

Massiivipuu ja CLT eivät vastaa suunnittelussa täysin toisiaan. Massiivipuun oletetaan hiiltyvän tasaisesti hiiltymisnopeuden mitoitusarvon mukaisesti ja hiiltynyt kerros jää suojaamaan sisempää osaa puusta. CLT- elementti koostuu useista liimaamalla yhdistetyistä puulevykerroksista. Kun ensimmäinen kerros on hiiltynyt kokonaan, se putoaa pois, sillä liima kerrosten on palanut pois. Hiiltynyt kerros ei siis jää suojaamaan takanaan olevaa rakennetta ja hiiltyminen jatkuu sisempiin kerroksiin.

Puurakenteen palosuojaaminen levytyksen avulla parantaa puurakenteen palonkestävyyttä silloin, kun suojaus on oikein suunniteltu. Kipsilevyllä tai vanerilevyllä suojattaessa tarkoituksena on siirtää hiiltymisen alkamisajankohtaa, jolloin puurakenne säilyttää täyden kantavuutensa pidempään. Hiiltyminen voi alkaa, joko ennen tai jälkeen levytyksen pettämisen. Mikäli lämpötila levytyksen takana pääsee nousemaan yli 300 °C:een, hiiltyminen alkaa levytyksen vielä suojatessa. Tällöin hiiltymisnopeus on mitoitusarvoa pienempi levytyksen pettämiseen asti. Hiiltyminen alkaa vasta levytyksen pudottua, mikäli levytys pystyy estämään liiallisen lämpötilan nousun levytyksen takana. Kun levytys putoaa, hiiltyminen tapahtuu hiiltymisnopeuden mitoitusarvoa suuremmalla nopeudella tiettyyn syvyyteen asti ja palaa sen jälkeen noudattamaan mitoitusarvon mukaista hiiltymisnopeutta. Syvyys, jossa hiiltymisnopeus palaa takaisin mitoitusarvon mukaiseen nopeuteen on 25 mm tai suojaamattoman puun hiiltymissyvyys kyseisellä ajanhetkellä.

Puun palonkestävyys paranee, kun rakenne suojataan levytyksellä. Usein käytetty levytys on palokipsilevy. Haasteita suunnitteluun tuottaa vähän tietoa kipsilevyjen pettämisaikakohdista. Suomessa voidaan soveltaa Suomen rakentamismääräyskokoelman asettamia murtohetkiä, sillä ne ovat kansallisia valintoja, joita sovelletaan kaikkien kipsilevyvalmistajien tuotteille. Myös vaneria käytetään puurakenteiden palosuojaamiseen.



## LÄHTEET

Bregulla, J., Dhima, D., Frangi, A., Hakkarainen, T., König, J., Mikkola, E., Stein, R., Östman, B. (2010), Fire safety in timber buildings, SP Technical Research Institute of Sweden Saatavissa: <https://ec.europa.eu/jrc/en>

Just, A., Schmid, J., König, J. (2010), Gybsum plasterboards used as fire protection - Analysis of a database, Tukholma, 28 p.

Metsäteollisuus ry (2005), Vanerikäsikirja, Lahti, Markprint Oy. Viitattu 24.11.2017 Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/Vanerik%C3%A4sikirja.pdf>

Puuinfo (2013), Puurakenteen palomitoitus, tekninen tiedote. Viitattu 24.11.2017 Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puurakenteen-palomitoitus/puurakenteenpalomitoitus.pdf>

RIL 205-2-2009 (2009), Puurakenteiden suunnitteluohje, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki

SFS- EN 1995-1-2 + AC (2015) Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleistä. Puurakenteiden palomitoitus, Rakennusteollisuus RTT

Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1995-1-2, Suomen rakentamismääräyskokoelma, lujuus ja vakaus, Ohje: Puurakenteet (2016), Ympäristöministeriö, Viitattu 19.2.2018 Saatavissa: [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden\\_lujuus\\_ja\\_vakaus](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Rakenteiden_lujuus_ja_vakaus)

Tiso, M. (2014), Charring behavior of cross laminated timber with respect to the fire protection, SP Technical Research Institute of Sweden

VTT (2010), Fire safety in timber buildings, FireInTimber- tutkimushankkeen päätulokset, Suomi

Wexon (Päivitetty 5.1.2018), Lämpötila-anturit, Wexon- teknisten komponenttien maa- hantuntuontia ja myyntiä, Viitattu 5.1.2018 Saatavissa: <http://www.wexon.fi/tuotteet/lampotila/lampotila-anturit/>

Willinder, P. (2009), Fire resistance in cross-laminated timber, Tekniska Högskolan i Jönköping